

Доктор физико-математических наук Б. ХРЕНОВ,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
МГУ им. М.В. Ломоносова.

НАУКА И ЖИЗНЬ®

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОНАВИГАЦИЯ

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

ЕСТЬ ЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ ДЛЯ ЧАСТИЦ, ПРИХОДЯЩИХ ИЗ КОСМОСА К ЗЕМЛЕ?

Прошло без малого сто лет с того момента, как были открыты космические лучи-потоки заряженных частиц, приходящих из глубин Вселенной. С тех пор сделано много открытий, связанных с космическими излучениями, но и загадок остается еще немало. Одна из них, возможно, наиболее интригующая: откуда берутся частицы с энергией более 10^{20} эВ, то есть почти миллиард триллионов электрон-вольт, в миллион раз большей, чем будет получена в мощнейшем ускорителе — Большом адронном коллайдере (LHC)? Какие силы и поля разгоняют частицы до таких чудовищных энергий?

Космические лучи открыл в 1912 году австрийский физик Виктор Гесс. Он был сотрудником Радиевого института Вены и проводил исследования ионизированных газов. К тому времени уже знали, что все газы (и атмосфера в том числе) всегда слегка ионизованы, что свидетельствовало о присутствии радиоактивного вещества (подобного радю) либо в составе газа, либо вблизи прибора, измеряющего ионизацию, вероятнее всего в земной коре. Попыты с подъемом детектора ионизации на воздушном шаре были задуманы для проверки этого предположения, так как с удалением от поверхности земли ионизация газа должна уменьшаться. Ответ получился противоположный: Гесс обнаружил некое излучение, интенсивность которого росла с высотой. Это наводило на мысль, что оно приходит из космоса, но окончательно доказать внеземное происхождение лучей удалось только после многочисленных опытов (Нобелевскую премию В. Гессу присудили лишь в 1936 году). Напомним, что термин «излучение» не означает, что эти лучи имеют чисто электромагнитную природу (как солнечный свет, радиоволны или рентгеновское излучение); его использовали при открытии явления, природа которого еще не была известна. И хотя вскоре выяснилось, что основная компонента космических лучей — ускоренные заряженные частицы, протоны, термин сохранился. Изучение нового явления быстро стало давать результаты, которые принято относить к «передовому краю науки».

Открытие космических частиц очень высокой энергии сразу же (еще задолго до того, как был создан ускоритель протонов)

вызвало вопрос: каков механизм ускорения заряженных частиц в астрофизических объектах? Сегодня мы знаем, что ответ оказался нетривиальным: природный, «космический» ускоритель кардинально отличается от ускорителей рукотворных.

Вскоре выяснилось, что космические протоны, пролетая сквозь вещество, взаимодействуют с ядрами его атомов, рождая неизвестные до этого нестабильные элементарные частицы (их наблюдали в первую очередь в атмосфере Земли). Исследование механизма их рождения открыло плодотворный путь для построения систематики элементарных частиц. В лаборатории протоны и электроны научились ускорять и получать огромные их потоки, несравнимо более плотные, чем в космических лучах. В конечном счете именно опыты по взаимодействию частиц, получивших энергию в ускорителях, привели к созданию современной картины микромира.

В 1938 году французский физик Пьер Оже открыл замечательное явление: ливни вторичных космических частиц, которые возникают в результате взаимодействия первичных протонов и ядер экстремально высоких энергий с ядрами атомов атмосферы



Крабовидная туманность, изученная в лучах с различной длиной волны. Голубой цвет — рентгеновские лучи (НАСА, рентгеновская обсерватория Чандра), зеленый — оптический диапазон (НАСА, обсерватория Хаббл), красный — инфракрасное излучение (ЕКА, обсерватория Спитцер)



Система телескопов H.E.S.S. в Намибии

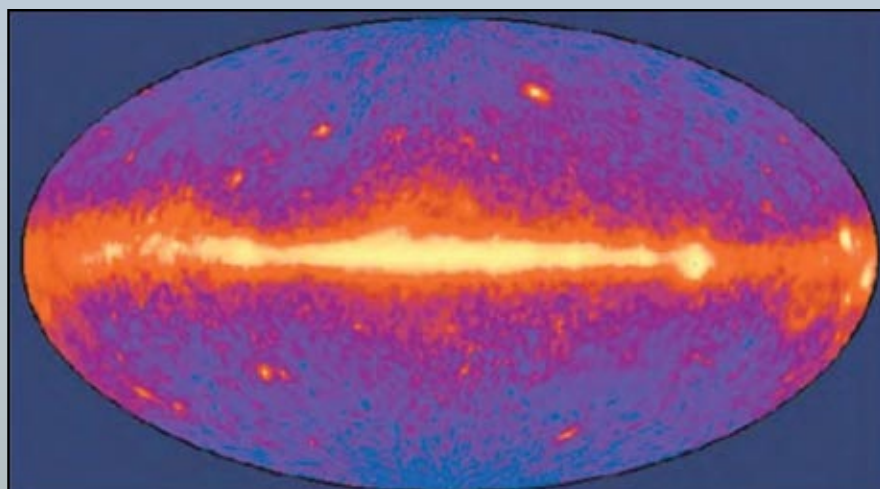
ры. Оказалось, что в спектре космических лучей есть частицы с энергией порядка 10^{15} - 10^{18} эВ — в миллионы раз большей энергии частиц, ускоряемых в лаборатории. Академик Дмитрий Владимирович Скобельцын придал особое значение изучению таких частиц и сразу после войны, в 1947 году, вместе с ближайшими коллегами Г.Т. Зацепиным и Н.А. Добротиным организовал комплексные исследования каскадов вторичных частиц в атмосфере, названных широкими атмосферными ливнями (ШАЛ). Историю первых исследований космических лучей можно найти в книгах Н. Добротина и В. Росси. Со временем школа Д.В. Скобельцына выросла в одну из самых сильных в мире и долгие годы определяла основные направления в изучении космических лучей сверхвысоких энергий. Ее методы позволили расширить диапазон исследуемых энергий от 10^9 - 10^{13} эВ, регистрируемых на воздушных шарах и спутниках, до 10^{13} - 10^{20} эВ. Особенно привлекательными эти исследования делали два аспекта.

Во-первых, появилась возможность использовать созданные самой природой протоны высокой энергии для изучения их взаимодействия с ядрами атомов атмосферы и расшифровки самой тонкой структуры элементарных частиц.

Во-вторых, возникла вероятность отыскать в космосе объекты, способные ускорить частицы до экстремально высоких энергий.

Первый аспект оказался не столь плодотворным, как хотелось: изучение тонкой структуры элементарных частиц потребовало гораздо больше данных о взаимодействии протонов, чем позволяют получить космические лучи. Вместе с тем важный вклад в представления о микромире дало изучение зависимости самых общих характеристик взаимодействия протонов от их энергии. Именно при изучении ШАЛ обнаружили особенность в зависимости количества вторичных частиц и их распределения по энергиям от энергии первичной частицы, связанную с кварк-глюонной структурой элементарных частиц. Эти данные позже подтвердились в опытах на ускорителях.

Сегодня построены достоверные модели взаимодействия космических лучей с ядрами атомов атмосферы, позволившие изучить энергетический спектр и состав их первичных частиц самых высоких энергий. Стало ясно, что космические лучи в динамике развития Галактики играют не меньшую роль, чем ее поля и потоки межзвездного газа: удельная энергия космических лучей, газа и магнитного поля примерно равны 1 эВ в см³. При таком балансе энергии в межзвездной среде естественно предположить,



Распределение направления прихода гамма-излучения с энергией 1-10 ГэВ в галактических координатах, по данным спутника EGRET

что ускорение частиц космических лучей происходит, скорее всего, в тех же объектах, которые отвечают за нагревание и выброс газа, например в Новых и Сверхновых звездах при их взрыве.

Первый механизм ускорения космических лучей предложил Энрико Ферми для протонов, хаотически сталкивающихся с намагниченными облаками межзвездной плазмы, но не смог объяснить всех экспериментальных данных.

В 1977 году академик Гермоген Филиппович Крымский показал, что этот механизм должен гораздо сильнее ускорять частицы в остатках Сверхновых на фронтах ударных волн, скорости которых на порядки выше скоростей облаков. Сегодня достоверно показано, что механизм ускорения космических протонов и ядер ударной волной в оболочках Сверхновых наиболее эффективен. Но воспроизвести его в лабораторных условиях вряд ли удастся: ускорение происходит сравнительно медленно и требует огромных затрат энергии для удержания ускоренных частиц. В оболочках Сверхновых эти условия существуют благодаря самой природе взрыва. Замечательно, что ускорение космических лучей происходит в уникальном астрофизическом объекте, который отвечает за синтез тяжелых ядер (тяжелее гелия), действительно присутствующих в космических лучах.

В нашей Галактике известны несколько Сверхновых возрастом меньше тысячи лет, которые наблюдались невооруженным глазом. Наиболее известны Крабовидная туманность в созвездии Тельца («Краб» — остаток вспышки Сверхновой в 1054 году, отмеченной в восточных летописях), Кассиопея-А (ее наблюдал в 1572 году астроном Тихо Браге) и Сверхновая Кеплера в созвездии Змееносца (1680). Диаметры их оболочек сегодня составляют



Черенковский детектор обсерватории «Пьер Оже». На холме расположен телескоп типа «глаз мухи»

5-10 световых лет (1 св. год = 10^{16} м), то есть они расширяются со скоростью порядка 0,01 скорости света и находятся на расстояниях примерно десять тысяч световых лет от Земли. Оболочки Сверхновых («туманностей») в оптическом, в радио-, рентгеновском и гамма-диапазонах наблюдали космические обсерватории «Чандра», «Хаббл» и «Спитцер». Они достоверно показали, что в оболочках действительно происходит ускорение электронов и протонов, сопровождаемое рентгеновским излучением.

Наполнить межзвездное пространство космическими лучами с измеренной удельной энергией (~ 1 эВ в см^3) могли бы около 60 остатков Сверхновых моложе 2000 лет, в то время как их известно менее десяти. Эта нехватка объясняется тем, что в плоскости Галактики, там, где сосредоточены звезды и Сверхновые в том числе, очень много пыли, которая не пропускает свет к наблюдателю на Земле. Наблюдения в рентгеновском и гамма-излучениях, для которых пылевой слой прозрачен, позволили расширить список наблюдаемых «молодых» Сверхновых оболочек. Последней из таких вновь открытых оболочек стала Сверхновая G1.9+0.3, наблюдаемая с помощью рентгеновского телескопа «Чандра» начиная с января 2008 года. Оценки размера и скорости расширения ее оболочки показывают, что она вспыхнула примерно 140 лет назад, но не была видна в оптическом диапазоне из-за полного поглощения ее света пылевым слоем Галактики.

К данным о Сверхновых, взрывающихся в нашей Галактике Млечный Путь, добавляются более богатые статистические данные о Сверхновых в других галактиках. Прямым подтверждением присутствия ускоренных протонов и ядер служит гамма-излучение с высокой энергией фотонов, возникающих в результате распада нейтральных пионов — продуктов взаимодействия протонов (и ядер) с веществом источника. Такие фотоны самых высоких энергий наблюдают с помощью телескопов, регистрирующих свечение Вавилова-Черенкова, излучаемое вторичными частицами ШАЛ. Самый совершенный инструмент такого типа — установка из шести телескопов, созданная при сотрудничестве HESS в Намибии. Гамма-излучение Краба было измерено первым, и его интенсивность стала мерой интенсивности для других источников.

Полученный результат не только подтверждает наличие механизма ускорения протонов и ядер в Сверхновой, но и позво-

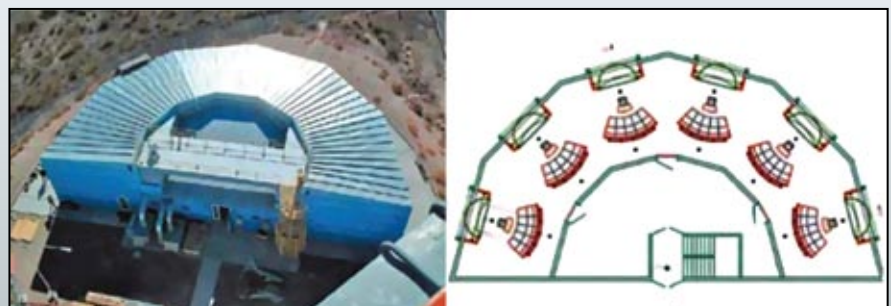
ляет также оценить спектр ускоренных частиц: спектры «вторичных» гаммаквантов и «первичных» протонов и ядер весьма близки. Магнитное поле в Крабе и его размер допускают ускорение протонов до энергий порядка 10^{15} эВ.

Спектры частиц космических лучей в источнике и в межзвездной среде несколько отличаются, так как вероятность выхода частиц из источника и время жизни частиц в Галактике зависят от энергии и заряда частицы. Сравнение энергетического спектра и состава космических лучей, измеренных у Земли, со спектром и составом в источнике позволило понять, как долго путешествуют частицы среди звезд. Ядер лития, бериллия и бора в космических лучах у Земли оказалось значительно больше, чем в источнике, их дополнительное количество появляется в результате взаимодействия более тяжелых ядер с межзвездным газом. Измерив эту разность, вычислили количество X того вещества, через которое прошли космические лучи, блуждая в межзвездной среде. В ядерной физике количество вещества, которое встречает частица на своем пути, измеряют в г/см^2 . Это связано с тем, что для вычисления уменьшения потока частиц в столкновениях с ядрами вещества надо знать число столкновений частицы с ядрами, имеющими разную поперечную к направлению частицы площадь (сечение). Выражая количество вещества в этих единицах, для всех ядер получается единая шкала измерения.

Экспериментально найденное значение $X \sim 5-10 \text{ г/см}^2$ позволяет оценить время жизни t космических лучей в межзвездной среде: $t \approx X/\rho c$, где c — скорость частиц, примерно равная скорости света, $\rho \sim 10^{-24} \text{ г/см}^3$ — средняя плотность межзвездной среды. Отсюда время жизни космических лучей порядка 10^8 лет. Это время намного превышает время пролета частицы, движущейся со скоростью c по прямой от источника до Земли ($3 \cdot 10^4$ лет для самых далеких источников на противоположной от нас стороне Галактики). Это означает, что частицы движутся не по прямой, а испытывают рассеяние. Хаотические магнитные поля галактики с индукцией $B \sim 10^{-6}$ гаусса (10^{-10} тесла) движут их по окружности радиусом (гирорадиусом) $R = E/3 \times 10^4 B$, где R — в м, E — энергия частицы в эВ, B — индукция магнитного поля в гауссах. При умеренных энергиях частиц $E < 10^{17}$ эВ, полученных в ускорителях-Сверхновых, гирорадиус оказывается значительно меньше размера Галактики ($3 \cdot 10^{20}$ м).

Приблизительно по прямой приходят от источника будут только частицы с энергией $E > 10^{19}$ эВ. Поэтому направление создающих ШАЛ частиц с энергией менее 10^{19} эВ не указывает на их источник. В этой области энергий остается только наблюдать вторичные излучения, генерируемые в самих источниках протонами и ядрами космических лучей.

В доступной для наблюдения области энергий гамма-излучения ($E < 10^{13}$ эВ) данные о направлении прихода его квантов убедительно показывают, что космические лучи излучают объемы, сконцентрированные в плоскости нашей Галактики. Там



Детектор флуоресценции атмосферы: шесть телескопов просматривают атмосферу в поле зрения 0-30° по высоте над горизонтом и в поле зрения 0-180° по азимуту

же сосредоточено и межзвездное вещество, с которым взаимодействуют частицы космических лучей, генерируя вторичное гамма-излучение.

Представление о космических лучах как «местном» галактическом явлении оказалось верно лишь для частиц умеренных энергий $E < 10^{17}$ эВ. Ограниченные возможности Галактики как ускорять, так и удерживать частицы с особенно высокой энергией были убедительно продемонстрированы в опытах по измерению энергетического спектра космических лучей.

В 1958 году Георгий Борисович Христиансен и Герман Викторович Куликов открыли резкое изменение вида энергетического спектра космических лучей при энергии порядка $3 \cdot 10^{15}$ эВ. При энергиях меньше этого значения экспериментальные данные о спектре частиц обычно представляли в «степенном» виде так, что число частиц N с заданной энергией E считалось обратно пропорциональным энергии частицы в степени γ : $N(E) = a/E^\gamma$ (γ — дифференциальный показатель спектра). До энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ показатель $\gamma = 2,7$, но при переходе к большим энергиям энергетический спектр испытывает «излом»: для энергий $E > 3 \cdot 10^{15}$ эВ γ становится 3,15. Это изменение спектра естественно связать с приближением энергии ускоренных частиц к максимально возможному значению, вычисленному для механизма ускорения в Сверхновых. В пользу такого объяснения излома спектра говорит и ядерный состав первичных частиц в области энергий 10^{15} - 10^{17} эВ. Наиболее надежные сведения о нем дают комплексные установки ШАЛ «МГУ», «Тунка», «Тибет», «Каскад». С их помощью получают не только сведения об энергии первичных ядер, но и параметры, зависящие от их атомных номеров, «ширину» ливня, соотношения между количеством электронов и мюонов, между количеством самых энергичных электронов и общим их количеством. Все эти данные свидетельствуют, что с ростом энергии первичных частиц от левой границы спектра до его излома к энергии после излома происходит увеличение их средней массы. Такое изменение состава частиц по массам согласуется с моделью ускорения частиц в Сверхновых — оно ограничено максимальной энергией, зависящей от заряда частицы. Для протонов эта максимальная энергия порядка $3 \cdot 10^{15}$ эВ и увеличивается пропорционально заряду ускоряемой частицы (ядра), так что ядра железа эффективно ускоряются вплоть до $\sim 10^{17}$ эВ. Интенсивность потоков частиц с энергией, превышающей максимальную, быстро падает.

Но регистрация частиц еще больших энергий ($\sim 3 \cdot 10^{18}$ эВ) показала, что спектр космических лучей не только не обрывается, но возвращается к виду, наблюдаемому до излома!

Измерения энергетического спектра в области «ультравысокой» энергии ($E > 10^{18}$ эВ) очень трудны из-за малого количества таких частиц. Для наблюдения этих редких событий необходимо создавать сеть из детекторов потока частиц ШАЛ и порожденных ими в атмосфере излучения Вавилова-Черенкова и ионизационного излучения (флуоресценции атмосферы) на площади в сотни и даже тысячи квадратных километров. Для подобных больших, комплексных установок выбирают места с ограниченной хозяйственной деятельностью, но с возможностью обеспечить надежную работу огромного числа детекторов. Такие установки были построены сначала на площадях в десятки квадратных километров (Якутск, Хавера Парк, Акено), затем в сотни (AGASA, Fly's Eye, HiRes), и, наконец, сейчас создаются установки в тысячи квадратных километров (обсерватория Пьер Оже в Аргентине, Телескопическая установка в штате Юта, США).

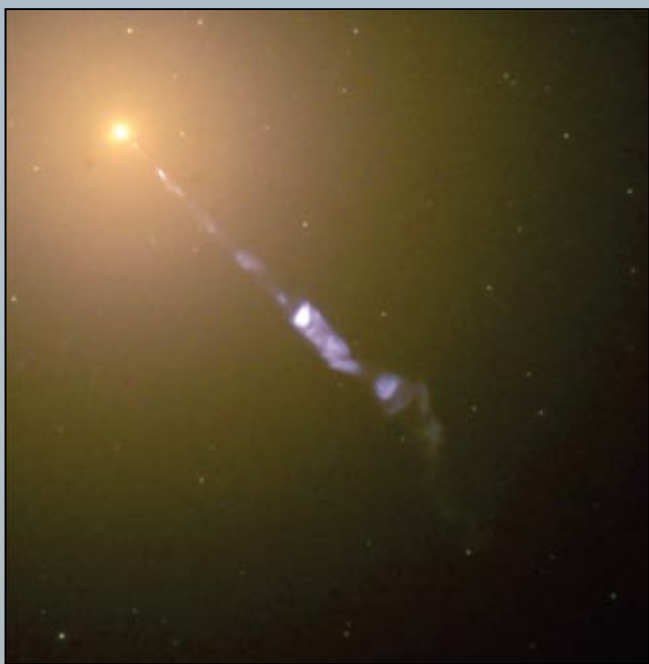
Следующим шагом в изучении космических лучей ультравысокой энергии станет развитие метода регистрации ШАЛ по наблюдению флуоресценции атмосферы из космоса. В кооперации с несколькими странами в России создается первый космический детектор ШАЛ, проект ТУС. Еще один такой детектор предполагается установить на Международной космической станции МКС (проекты JEM-EUSO и КЛПВЭ).



Космический детектор ТУС будет наблюдать ШАЛ ультравысокой энергии с орбиты Земли

Что мы сегодня знаем о космических лучах ультравысокой энергии? На нижнем рисунке представлен энергетический спектр космических лучей с энергией выше 10^{18} эВ, который получен на установках последнего поколения (HiRes, обсерватория Пьер Оже) вместе с данными о космических лучах меньших энергий, которые, как было показано выше, принадлежат Галактике Млечный Путь. Видно, что при энергиях $3 \cdot 10^{18}$ - $3 \cdot 10^{19}$ эВ показатель дифференциального энергетического спектра уменьшился до значения 2,7-2,8, именно такого, который наблюдается для галактических космических лучей, когда энергии частиц гораздо меньше предельно возможных для галактических ускорителей. Не служит ли это указанием на то, что при ультравысоких энергиях основной поток частиц создают ускорители внегалактического происхождения с максимальной энергией значительно больше галактической? Излом в спектре галактических космических лучей показывает, что вклад внегалактических космических лучей резко меняется при переходе от области умеренных энергий 10^{14} - 10^{16} эВ, где он примерно в 30 раз меньше вклада галактических (спектр, обозначенный на рисунке пунктиром), к области ультравысоких энергий, где он становится доминирующим.

В последние десятилетия накоплены многочисленные астрономические данные о внегалактических объектах, способных ускорять заряженные частицы до энергий гораздо больше 10^{19} эВ. Очевидным признаком того, что объект размером D может ускорять частицы до энергии E , служит наличие на всем протяжении этого объекта магнитного поля B такого, что гирорадиус частицы меньше D . К таким источникам-кандидатам относятся радиогалактики (испускающие сильные радиоизлучения); ядра активных галактик, содержащие черные дыры; сталкивающиеся галактики. Все они содержат струи газа (плазмы), движущиеся с огромными скоростями, приближающимися к скорости света. Такие струи играют роль ударных волн, необходимых для работы ускорителя. Чтобы оценить их вклад в наблюдаемую интенсивность космических лучей, нужно учесть распределение источни-



Струя релятивистского газа, выбрасываемая из эллиптической галактики M87

ков по расстояниям от Земли и потери энергии частиц в межгалактическом пространстве. До открытия фонового космического радиоизлучения межгалактическое пространство казалось «пустым» и прозрачным не только для электромагнитного излучения, но и для частиц ультравысокой энергии. Плотность газа в межгалактическом пространстве, по астрономическим данным, настолько мала (10^{-29} г/см³), что даже на огромных расстояниях в сотни миллиардов световых лет (10^{24} м) частицы не встречают ядер атомов газа.

Однако, когда оказалось, что Вселенная наполнена мало энергичными фотонами (примерно 500 фотонов/см³ с энергией $E_f \sim 10^{-3}$ эВ), оставшимися после Большого взрыва, стало ясно, что протоны и ядра с энергией больше $E \sim 5 \cdot 10^{19}$ эВ, предела Грейзена Зацепина Кузьмина (ГЗК), должны взаимодействовать с фотонами и на пути более десятков миллионов световых лет терять большую часть своей энергии. Таким образом, подавляющая часть Вселенной, находящаяся на расстояниях более 10^7 световых лет от нас, оказалась недоступной для наблюдения в лучах с энергией более $5 \cdot 10^{19}$ эВ.

Последние экспериментальные данные о спектре космических лучей ультравысокой энергии (установка HiRes, обсерватория Пьер Оже) подтверждают существование этого энергетического предела для частиц, наблюдаемых с Земли.

Как видно, изучать происхождение космических лучей ультравысокой энергии чрезвычайно трудно: основная часть возможных источников космических лучей самых высоких энергий (выше предела ГЗК) находятся столь далеко, что частицы на пути к Земле теряют приобретенную в источнике энергию. А при энергиях меньше предела ГЗК отклонение частиц магнитным полем Галактики еще велико, и направление прихода частиц вряд ли сможет указать положение источника на небесной сфере.

В поиске источников космических лучей ультравысокой энергии используют анализ корреляции экспериментально измеренного направления прихода частиц с достаточно высокими энергиями — такими, что поля Галактики несильно отклоняют частицы от направления на источник. Установки предыдущего поколения пока не дали убедительных данных о корреляции направления прихода частиц с координатами какого-либо специально выделенного класса астрофизических объектов. Последние данные

обсерватории Пьер Оже можно рассматривать как надежду на получение в ближайшие годы данных о роли источников типа AGN в создании интенсивных потоков частиц с энергией порядка предела ГЗК.

Интересно, что на установке AGASA были получены указания на существование «пустых» направлений (таких, где нет никаких известных источников), по которым за время наблюдения приходят две и даже три частицы. Это вызвало большой интерес у физиков, занимающихся космологией — наукой о происхождении и развитии Вселенной, неразрывно связанной с физикой элементарных частиц. Оказывается, что в некоторых моделях структуры микромира и развития Вселенной (теории Большого взрыва) предсказано сохранение в современной Вселенной сверхмассивных элементарных частиц с массой порядка 10^{23} – 10^{24} эВ, из которых должно состоять вещество на самой ранней стадии Большого взрыва. Их распределение во Вселенной не очень ясно: они могут быть либо равномерно распределены в пространстве, либо «притянуты» к массивным областям Вселенной. Главная их особенность в том, что эти частицы нестабильны и могут распадаться на более легкие, в том числе на стабильные протоны, фотоны и нейтрино, которые приобретают огромные кинетические энергии более 10^{20} эВ. Места, где сохранились такие частицы (топологические дефекты Вселенной), могут оказаться источниками протонов, фотонов или нейтрино ультравысокой энергии.

Как и в случае галактических источников, существование внегалактических ускорителей космических лучей ультравысокой энергии подтверждают данные детекторов гамма-излучения, например телескопы установки HESS, направленные на перечисленные выше внегалактические объекты — кандидаты в источники космических лучей.

Среди них самыми перспективными оказались ядра активных галактик (AGN) со струями газа. Один из наиболее хорошо изученных на установке HESS объектов — галактика M87 в созвездии Дева, на расстоянии 50 миллионов световых лет от нашей Галактики. В ее центре находится черная дыра, которая обеспечивает энергией процессы вблизи нее и, в частности, гигантскую струю плазмы, принадлежащей этой галактике. Ускорение космических лучей в M87 прямо подтверждают наблюдения ее гамма-излучения, энергетический спектр фотонов которого с энергией $1 \cdot 10$ ТэВ (10^{12} – 10^{13} эВ), наблюдаемый на установке HESS, представлен на графике. Наблюдаемая интенсивность гамма-излучения от M87 составляет примерно 3% от интенсивности Краба. С учетом разницы в расстоянии до этих объектов (5000 раз) это означает, что светимость M87 превышает светимость Краба в 25 миллионов раз!

Модели ускорения частиц, созданные для этого объекта, показывают, что интенсивность частиц, ускоряемых в M87, может быть так велика, что даже на расстоянии 50 миллионов световых лет вклад этого источника сможет обеспечить наблюдаемую интенсивность космических лучей с энергией выше 10^{19} эВ.

Но вот загадка: в современных данных о ШАЛ по направлению на этот источник нет избытка частиц с энергией порядка 10^{19} эВ. А не проявится ли этот источник в результатах будущих космических экспериментов, при таких энергиях, когда дальние источники уже не дают вклада в наблюдаемые события? Ситуация с изломом в энергетическом спектре может повториться еще раз, например при энергии $2 \cdot 10^{20}$. Но на этот раз источник должен быть виден в измерениях направления траектории первичной частицы, так как энергии $> 2 \cdot 10^{20}$ эВ настолько велики, что частицы не должны отклоняться в галактических магнитных полях.

Как видим, после столетней истории изучения космических лучей мы снова ждем новых открытий, на этот раз космического излучения ультравысокой энергии, природа которого пока неизвестна, но может играть важную роль в устройстве Вселенной.

